

반대방향의 방향각을 갖는 2열 분사구조의 막냉각 특성 (I)

- 배열의 영향 -

안 준[†] · 정인성^{*} · 이준식^{**}

(2001년 3월 2일 접수, 2001년 5월 23일 심사완료)

Film Cooling from Two Rows of Holes with Opposite Orientation Angles (I)

- Configuration Effect -

Joon Ahn, In Sung Jung and Joon Sik Lee

Key Words: Film Cooling(막냉각), Compound Angle(복합분사각), Boundary Layer Temperature (경계층 온도장), Adiabatic Film Cooling Effectiveness(단열막냉각효율), Heat Transfer Coefficient Ratio(열전달계수비)

Abstract

Film cooling performance from two rows of holes with opposite orientation angles is evaluated in terms of heat flux ratio. The film cooling hole has a fixed inclination angle of 35° and orientation angle of 45° for the downstream row and -45° for the upstream row. Four film cooling hole arrangements including inline and staggered configurations are investigated. The blowing ratio studied was 1.0. Boundary layer temperature distributions are measured to investigate injectant behaviors and mixing characteristics. Detailed distributions of the adiabatic film cooling effectiveness and the heat transfer coefficient are measured using TLC(Thermochromic Liquid Crystal). For the inline configuration, there forms a downwash flow at the downstream hole exit to make the injectant well attach to the wall, which gives high adiabatic film cooling effectiveness and heat transfer coefficient. The evaluation of heat flux ratio shows that the inline configuration gives better film cooling performance with the help of the downwash flow at the downstream hole exits.

기호설명

- | | |
|--|--|
| <p>D : 분사홀의 지름</p> <p>Fr : Froud 수 $\left(= \frac{U_c}{\sqrt{gD \left \frac{\rho_c - \rho_\infty}{\rho_\infty} \right }} \right)$</p> <p>$h$: 열전달계수</p> <p>H : 형상계수 $(= \delta^* / \theta)$</p> <p>L : 분사홀의 길이</p> | <p>M : 분사비 $(= \rho_c U_c / \rho_\infty U_\infty)$</p> <p>$Re_D$: Reynolds 수 $\left(= \frac{U_\infty D}{\nu} \right)$</p> <p>$q$: 열유속</p> <p>T : 온도</p> <p>x, y, z : 주유동방향, 수직방향, 폭방향 좌표</p> |
|--|--|

그리스문자

- α : 경사각
- β : 방향각
- δ : 경계층 두께 $(0.99U_\infty \text{ 기준})$
- δ^* : 배제두께
- η : 단열막냉각효율 $\left(= \frac{T_{aw} - T_\infty}{T_c - T_\infty} \right)$

[†] 책임저자, 회원, 서울대학교 대학원

E-mail : pajaro1@snu.ac.kr

TEL : (02)880-7123 FAX: (02)883-0179

^{*} 서울대학교 터보·동력기계연구소

^{**} 회원, 서울대학교 기계항공공학부

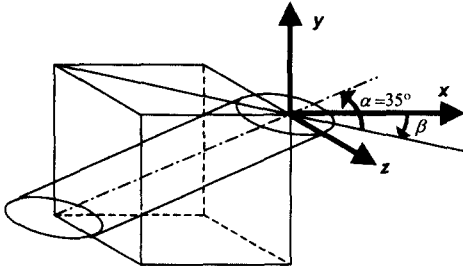


Fig. 1 Hole configuration

- θ : 운동량두께
- Γ : 온도비 $\left(= \frac{T - T_{\infty}}{T_w - T_{\infty}} \right)$
- Θ : 무차원 온도 $\left(= \frac{T - T_{\infty}}{T_c - T_{\infty}} \right)$
- Ψ : 전체막냉각효율 $\left(= \frac{T_w - T_{\infty}}{T_c - T_{\infty}} \right)$

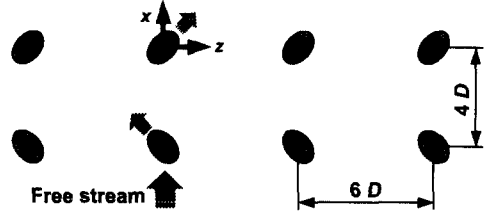
하첨자

- 0 : 막냉각이 없는 경우
- ∞ : 주유동
- aw : 단열 벽면
- c : 막냉각 유체
- f : 막냉각이 있는 경우
- w : 벽면

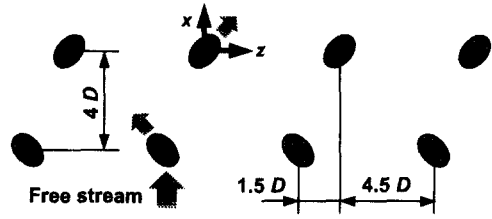
1. 서론

가스터빈의 입구 온도를 높임으로써 터빈효율을 높일 수 있다. 그러나 재료의 내열 한계로 온도를 높이기 위해서는 효율적인 냉각 방법이 필요하다. 이를 위해 개발된 여러 가지 냉각 방법 중에서 막냉각은 냉각 효과가 커서 지금까지 집중적으로 연구되고 있는 분야이다. 막냉각은 냉각하려는 면에 구멍을 뚫어 냉각 유체를 분사하여 단열막을 형성하게 함으로써 고온의 주유동으로부터 표면을 보호하는 냉각방법이다.

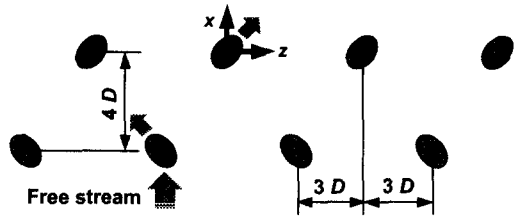
막냉각 성능에는 분사형상, 주유동 조건, 주유동과 냉각유체의 분사비와 온도비 등 많은 변수가 영향을 주는 것으로 알려져 있고, 본 연구는 분사 형상에 초점을 두고 진행되었다. 분사 형상에 대해서는 분사홀의 형상, 홀 사이의 간격, 분



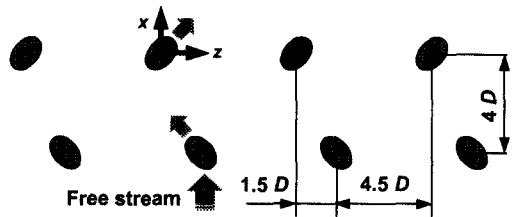
(a) Configuration 1 (inline)



(b) Configuration 2



(c) Configuration 3 (staggered)



(d) Configuration 4

Fig. 2 Injection hole configurations

사 각도, 분사홀 열의 수 등이 막냉각 성능에 미치는 영향에 대한 연구가 수행되고 있다. 본 연구에서는 복합분사각을 채택하였다. 복합분사각을 채택한 막냉각 홀은 Fig. 1과 같이 경사각(α)

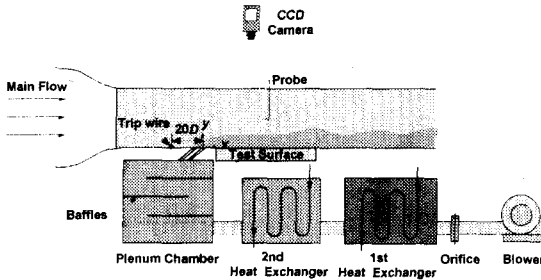


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

과 방향각(β)으로 표현되는 두 가지 특성각을 갖는다. 복합분사각을 채택한 경우 방향각을 갖기 때문에 냉각유체가 횡방향의 속도 성분을 갖게 되고 횡방향으로 보다 균일한 막냉각 효과를 보이게 된다. 복합분사각을 채택하면 단순분사각과 다른 유동 구조를 갖게 되어 막냉각 효율이 높아지고 열전달계수가 커진다.⁽¹⁻³⁾

실제 가스터빈 블레이드의 경우 한 개에서 다섯 개까지의 분사 홀 열이 단열막을 형성하도록 분사 홀을 배열한다.⁽⁴⁾ 따라서 2열 분사에 대한 연구가 이루어졌고 1열 분사의 결과만으로 예측할 수 없는 몇 가지 특징들을 발견할 수 있었다. 기존의 2열 분사구조에 대한 연구는 상류홀과 하류홀의 방향각을 같게 했고 엇갈린 배열을 주로 채택하였다. 복합분사각을 채택한 경우 막냉각유체가 횡방향의 운동량을 갖게 되어 하류로 진행하면서 궤적이 횡방향으로 이동하게 된다. 따라서 방향각이 없는 경우와 달리 엇갈린 배열이 최적의 배열이 아닐 수 있고 상류 홀과 하류 홀의 상대적 위치가 중요해진다. 또한 상류 홀과 하류 홀의 방향각을 반대로 하면 막냉각 유체의 분사로 생성된 강한 와류가 상호작용하여 막냉각유체의 궤적에 큰 영향을 줄 수 있고 이는 막냉각 성능에 직결된다.

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 상류 홀과 하류 홀의 방향각이 각각 -45° 와 45° 인 2열 분사구조의 막냉각 특성을 관찰하였다. 정열배열과 엇갈린 배열을 포함한 4가지 배열에 대하여 고찰하였으며, Fig. 2에서 배열 1과 3이 각각 정열배열과 엇갈린 배열이고 배열 2와 4는 그 중간에 해당하는 배열이다.

막냉각유체의 거동을 파악하기 위해 분사 제트를 가열하여 주유동과 온도차를 갖게 하고 하류

Table 1 Experimental conditions

U_∞	10 m/s
D	10 mm
δ/D	1.5
$H(= \delta^*/\theta)$	1.36
L/D	4.0
M	1.0
$Re_D(= U_\infty D/\nu)$	6570

에 생성된 열경계층의 온도분포를 측정하였다. 또한 감온성 액정을 이용하여 표면온도를 측정함으로써 막냉각 면의 막냉각효율과 열전달계수의 분포를 높은 해상도로 얻을 수 있었고 이를 막냉각 제트의 거동과 연관지어 해석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 조건

실험장치는 Fig. 3과 같이 막냉각이 이루어지는 상황을 모사하고 막냉각성능을 측정할 수 있도록 구성하였다. 이를 위해서 먼저 풍동을 이용하여 주유동을 형성하고, 정체실에서 분사홀을 통해 막냉각유체를 분사했고, 분사홀 하류의 막냉각 되는 면에 측정판을 설치하였다. 단열을 위해 측정판 밑에는 50 mm두께의 폴리스티렌판을 부착하였다. 풍동은 6.25:1 수축비의 개방형 아음속풍동이고 출구는 길이 3.0 m, 너비 0.4 m, 높이 0.28 m의 덕트로 이어진다. 분사홀에서 20D 상류 위치에 지름 1.8 mm의 트립와이어를 설치하여 난류경계층을 형성하도록 하였다. 실험조건은 Table 1에 제시하였다.

막냉각 유체는 인버터로 제어되는 송풍기를 이용해서 공급하였다. 열교환기는 측정하는 변수에 따라 분사유체를 주위 공기 온도보다 높게 가열하거나 주위의 공기와 같은 온도로 제어하는 역할을 한다.

2.2 경계층 온도장 측정

막냉각성능은 막냉각유체와 벽면의 상대적 위치와 막냉각유체가 에너지를 흡수하는 정도에 의해 결정된다. 이러한 정보는 경계층 온도장을 측정해서 얻을 수 있다. 막냉각유체를 주유동 온도

보다 높게 가열하고 벽면을 단열한 상태에서 y - z 평면에서 온도장을 측정하면 측정 면에서 막냉각 유체의 분포를 구할 수 있다. 이와 같은 연구를 보다 체계적으로 진행하기 위해 경계층 온도를 다음과 같이 무차원화하였다.

$$\Theta = \frac{T - T_{\infty}}{T_c - T_{\infty}} \quad (1)$$

위와 같이 정의하면, 막냉각 유체가 유일한 열원이 되어 경계층에서 무차원 온도 Θ 는 0에서 1 사이의 값을 갖는다. 무차원 온도 Θ 가 0이면 경계층 온도가 주유동과 같다는 뜻이고 따라서 그 위치에 막냉각 유체가 존재하지 않는 것을 의미한다. 반면에 Θ 가 1이면 경계층 온도가 정체실에서 측정된 막냉각 유체의 온도와 같고 이는 주유동과 혼합되지 않은 막냉각유체만이 있다는 의미가 된다. 즉, 무차원 온도 Θ 는 경계층 내에서 막냉각유체의 농도를 의미한다.

경계층 온도장과 단열막냉각효율을 측정할 때 주유동은 20℃, 막냉각유체는 40℃로 유지하였다. 이때 주유동과 분사유체의 밀도비(= ρ_c / ρ_{∞})가 0.93이 되는 데 본 연구에서 관찰한 분사비 1.0의 경우 Froud 수가 127이 되어 부력의 영향은 관성력에 비해 상대적으로 무시할 수 있다. 온도장은 상대오차가 0.1%이내인 백금저항온도계로 교정한 T형 열전대를 이용하여 측정하였다.

2.3 단열막냉각효율

막냉각 제트가 벽면을 얼마나 잘 보호해주는지는 막냉각 제트를 가열하고 벽면온도의 분포를 보면 알 수 있다. 이때, 무차원 벽면 온도는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\eta = \frac{T_{aw} - T_{\infty}}{T_c - T_{\infty}} \quad (2)$$

여기서, T_{aw} 는 단열벽면온도이고 η 는 단열막냉각효율이라고 한다. 이렇게 정의한 η 는 식 (1)에서 정의한 무차원 온도 Θ 의 벽면 값이 되므로 0에서 1사이의 값을 갖는다. 단열막냉각효율 η 가 1.0이라는 것은 벽면이 막냉각 제트에 의해 완벽하게 보호되고 있음을 의미한다. 반면에 단열막냉각효율이 0.0이라는 것은 벽면이 막냉각유체에

의해 전혀 보호받지 못하고 있음을 뜻한다.

이러한 막냉각효율을 구하기 위해서는 막냉각 유체를 주유동보다 높게 가열하고 단열벽면온도, 주유동 온도, 막냉각 제트 온도의 세 가지 온도를 측정해야 한다. 주유동 온도와 막냉각 제트의 온도는 항온조에서 백금저항온도계를 기준으로 교정한 T형 열전대를 이용하여 측정하였다. 단열벽면온도 T_{aw} 는 변색범위가 20℃~30℃인 TLC (Thermochromic Liquid Crystal: 감온성 액정)를 이용해 측정하였다. 이를 위해서 측정판 위 $1.0 \leq x/D \leq 31.0$, $-12.0 \leq z/D \leq 12.0$ 범위에 감온성 액정판을 부착하였다. 본 연구에서는 액정판을 이용하여 하나의 영상으로부터 원하는 면 전체의 온도 분포를 얻었다.

2.4 열전달계수

막냉각에서는 벽면 온도, 주유동 온도, 막냉각 유체 온도의 세 가지 특성 온도가 있다. 따라서 열전달계수의 정의도 이들 중 어떤 온도를 기준으로 하는가에 따라 달라지게 된다. Eckert⁽⁵⁾는 열전달계수 h_f 를 다음과 같이 정의하였다.

$$q_f = h_f (T_{aw} - T_w) \quad (3)$$

여기서 T_{aw} , T_w , q_f 는 각각 단열벽면온도, 벽면 온도, 열유속을 의미한다. 이렇게 정의하면 단열벽면온도와 벽면 온도가 같아질 때 열유속이 0이 되는 것을 확인할 수 있다. 단열벽면온도는 분사형상, 주유동 온도, 막냉각유체의 온도 등에 관계된다. 이러한 의존성을 없애기 위해서는 식 (2)에서 정의한 단열막냉각효율의 형태로 무차원화해야 한다. 한편, 열전달계수는 주유동과 벽면 온도를 기준으로 다음과 같은 형태로 다시 정의할 수 있다.

$$q_f = h (T_{\infty} - T_w) \quad (4)$$

식 (4)을 식 (3)으로 나누고 정리하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\frac{h}{h_f} = 1 - \eta \Gamma \quad (5)$$

여기서, Γ 는 다음과 같이 정의된다.

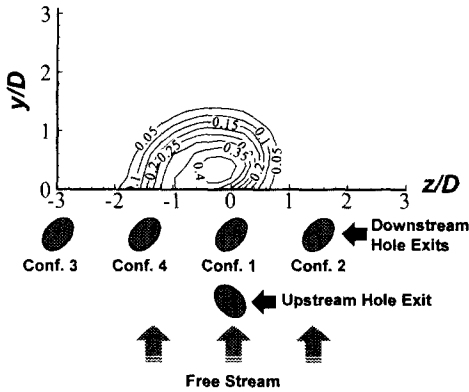


Fig. 4 Boundary layer temperature distributions at downstream hole exit

$$\Gamma = \frac{T_c - T_\infty}{T_w - T_\infty} \quad (6)$$

만약 분사 유체의 온도 T_c 와 주유동 온도 T_∞ 가 같다면 Γ 는 0이 되고 식 (5)에서 h_f 와 h 는 같은 값을 갖게 된다. 본 연구에서는 막냉각유체의 온도와 주유동의 온도를 같게 유지한 상태에서 벽면에 일정열유속을 가하고 표면온도를 변색 범위 25°C~45°C인 액정을 이용해서 측정하여 열전달계수를 구하였다.

2.5 열유속비 분포의 계산

막냉각을 할 경우 단열막을 형성하여 열부하를 줄여주지만 막냉각 제트가 유동을 교란하여 열전달계수를 높일 수 있다. 따라서 막냉각 성능을 평가하기 위해서는 막냉각이 있을 때와 없을 때의 열유속비를 계산해야 한다.

막냉각이 없을 때 표면에 가해지는 열부하는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$q_0 = h_0 (T_\infty - T_w) \quad (7)$$

막냉각이 있을 때의 열부하는 식 (3)과 같이 정의할 수 있고 식 (7)과 식 (3)으로부터 열유속비를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{q_f}{q_0} = \frac{h_f}{h_0} \left(1 - \frac{\eta}{\Psi} \right) \quad (8)$$

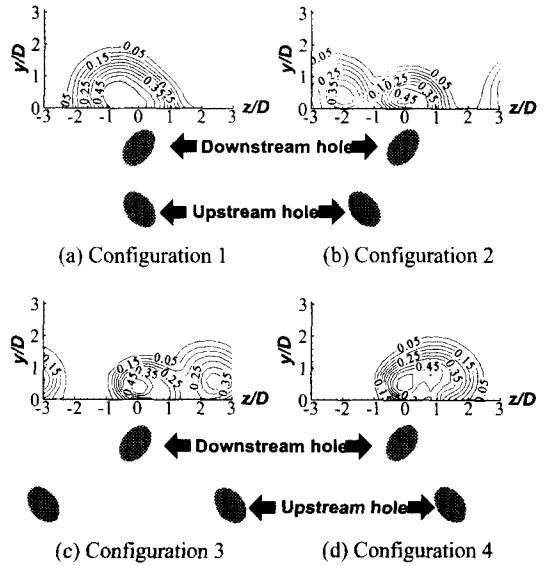


Fig. 5 Boundary layer temperature distributions at $x/D = 3.0$

여기서, Ψ 는 다음과 같이 정의되는 전체 막냉각 효율이다.

$$\Psi = \frac{1}{\Gamma} = \frac{T_w - T_\infty}{T_c - T_\infty} \quad (9)$$

막냉각이 있는 가스터빈 블레이드의 경우 Ψ 는 0.5에서 0.7 정도의 값을 갖는다.⁽⁶⁾ 본 연구에서는 Ψ 를 실제 가스터빈의 전형적인 값인 0.6으로 계산하였다. 열유속비의 정의로부터 열유속비가 1보다 작은 경우에만 막냉각에 의해 열부하가 감소한 것이고 열유속비가 1보다 큰 경우는 막냉각에 의해 오히려 가스터빈의 열부하가 증가했음을 의미한다.

측정한 변수들의 불확실성은 Kline과 McClintock⁽⁷⁾이 제안한 단일표본실험법에 의해 95%의 신뢰수준으로 평가했다. 무차원 온도 θ 와 단열막냉각효율 η 의 경우 전형적인 값인 0.2일 때 각각 5.7%, 6.8%로 산정되었다. 한편, 열전달계수비의 경우 $h_f/h_0 = 1.2$ 일 때 9.5%로 평가되었다. 열유속비는 $\eta = 0.2$, $h_f/h_0 = 1.2$ 인 경우를 기준으로 10.1%의 불확실성을 갖는다.

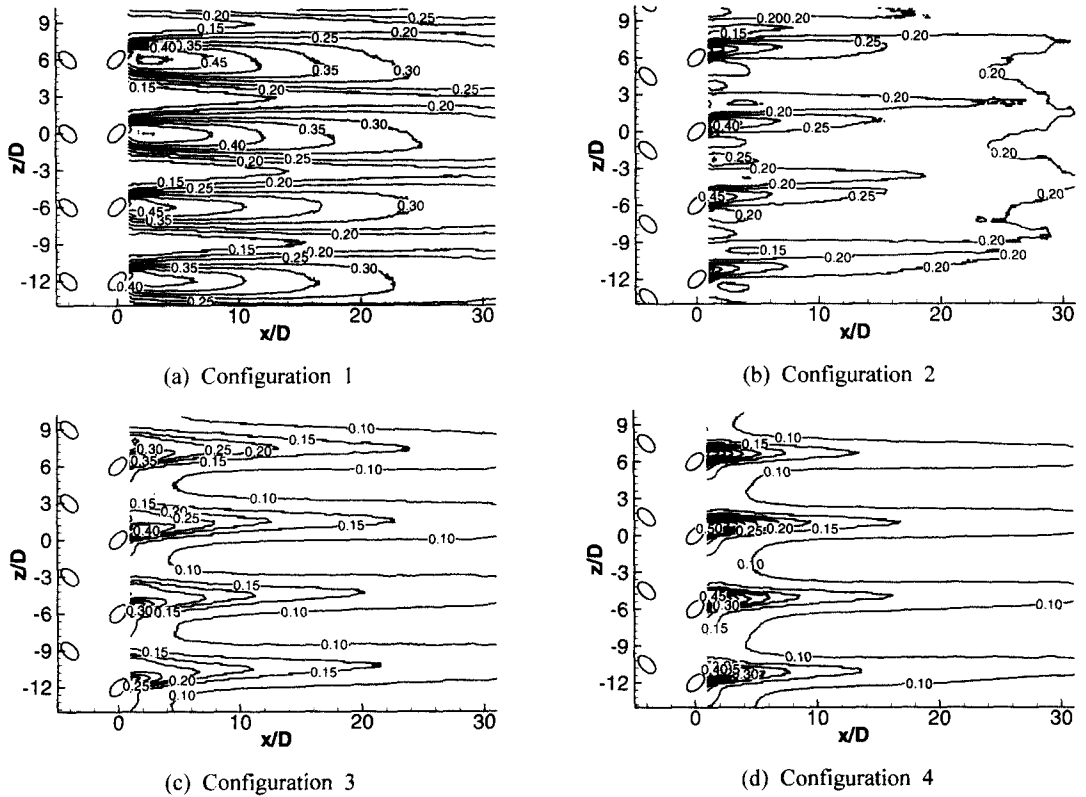


Fig. 6 Adiabatic film cooling effectiveness distributions

3. 결과 및 토의

3.1 경계층 온도장 특성

각각의 배열에서 하류 홀 출구에서의 유동 조건을 파악하기 위해서 하류 홀을 막고 상류 홀에서 분사된 막냉각 제트의 분포를 측정하여 Fig. 4에 제시하였다. 상류 홀의 방향각은 -45° 이므로 Fig. 4에서 시계방향의 와류가 생기게 된다. 한편 상류 홀의 중심은 $z/D = 0$ 이지만 상류 홀에서 분사된 제트는 $-z$ 방향의 운동량을 가지므로 하류 홀 출구위치에서 제트의 중심이 $z/D = -0.3$ 부근에 위치하는 것을 볼 수 있다. 이에 따라 하류 홀 출구위치에 정열배열(배열 1)의 경우 하향류가, 배열 4의 경우 상향류가 존재하게 된다.

막냉각 성능은 막냉각 유체와 냉각면 사이의 상대적 위치와 막냉각 유체가 에너지를 흡수하고 저장하는 능력에 의해 결정된다. 이는 온도장 분포에서 제트 중심의 위치 및 온도로부터 파악할

수 있다. 홀 출구에 하향류가 존재하는 정열배열의 경우(Fig. 5(a)), 제트의 중심이 벽면 가까이 위치하지만 상향류가 존재하는 배열 4(Fig. 5(d))의 경우 $y/D = 0.5$ 부근에 위치하는 것을 볼 수 있다.

등온선과 벽면이 만나는 위치를 살펴보면 정열배열의 경우 가장 높은 수준의 등온선이 $-1.0 \leq z/D \leq 0.0$ 에 해당하는 영역을 덮고 있으므로 막냉각효율이 높은 영역이 넓게 형성되리라는 것을 예상할 수 있다. 그러나 배열 4의 경우 가장 높은 온도 수준인 $\theta = 0.5$ 등온선은 벽면과 만나지 않고 벽면과 만나는 가장 높은 온도의 등온선이 덮고 있는 영역도 정열배열에 비해 크게 줄어든 것을 볼 수 있다. 한편, 상류 홀과 하류 홀에서 분사된 제트의 중심이 가까운 정열배열이나 배열 4의 경우 제트 중심의 온도는 높지만, $\theta = 0.05$ 등온선이 벽면과 만나는 위치를 살펴보면 배열 2나 3에 비해 막냉각에 의해 보호되지 못하는 영역이 넓은 것을 볼 수 있다.

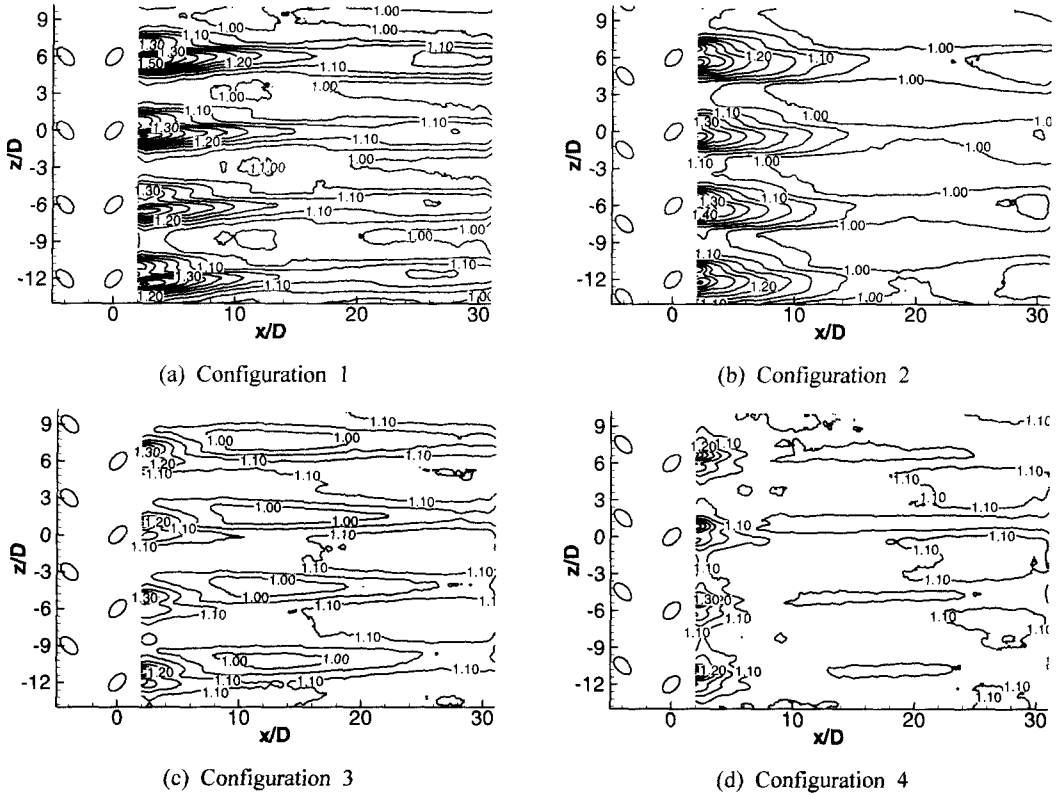


Fig. 7 Heat transfer coefficient ratio distributions

3.2 단열막냉각효율

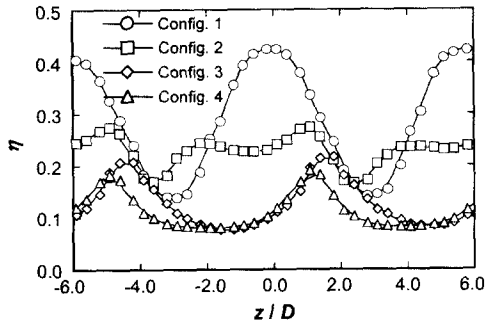
각 배열에 따른 단열막냉각효율 분포를 나타낸 Fig. 6을 보면, 상류 홀이 없는 경우⁽⁸⁾와 달리 반대방향의 방향각을 갖는 2열 분사구조의 경우, z 방향의 운동량이 상쇄되어 제트의 궤적이 z 방향으로 굴절되지 않는 것을 볼 수 있다. 정열배열의 경우(Fig. 6(a)) 제트의 중심이 벽면에 가까이 위치하고 제트 중심의 온도가 높으므로 막냉각 효율이 다른 형상에 비해 큰 것을 볼 수 있다. $\eta = 0.3$ 등온선을 살펴보면, 다른 형상에서는 $x/D = 5.0$ 이내에 존재하지만 정열배열의 경우 $x/D = 20.0$ 이후에도 관찰할 수 있다.

배열 2의 경우(Fig. 6(b)) 막냉각 효율이 폭방향으로 비교적 고른 분포를 보인다. 그러나 정열배열의 경우 상류쪽에 홀과 홀 사이에 $\eta = 0.15$ 등온선으로 둘러싸인 삼각형 모양의 막냉각 효율이 낮은 영역이 존재하고 엇갈린 배열(배열 3)이나 배열 4의 경우에도 홀과 홀 사이에서 막냉각 효율이 크게 낮아지는 것을 관찰할 수 있다.

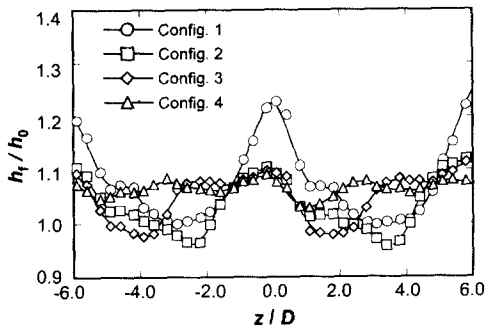
3.3 열전달계수

막냉각이 있을 때의 열전달계수는 크게 두 가지 요인에 의해 증가한다고 할 수 있다. 우선 막냉각유체와 주유동 사이의 전단층에서 발생하는 2차 유동에 의해 와류의 하향류 부분에서 경계층이 얇아지고 주유동이 유입되면서 열전달계수가 증가하게 된다. 또 다른 요인은 막냉각 제트가 주유동에 대해 장애물로 작용하여 막냉각유체 밑에 강한 난류를 형성하게 되고 그에 따라 열전달계수도 증가하게 된다.⁽⁹⁾ 이러한 영향은 막냉각유체가 벽면에서 분리되는 상향류 위치에서 두드러지게 나타난다.

상류 홀이 없을 경우 $x/D = 6.0$ 이내에서는 위에서 설명한 두가지 메커니즘이 모두 나타나지만 하류로 진행하면서 와류의 영향이 강해지는 것을 볼 수 있었다.⁽⁸⁾ Fig. 7에 나타난 각각의 배열에 따른 막냉각이 있을 때와 없을 때의 열전달계수비 분포를 보면, 상류 열과 하류 열의 상대적 배열에 따라 제트의 궤적이 달라지고 열전달계수비



(a) Adiabatic film cooling effectiveness (η)



(b) Heat transfer coefficient ratio (h_f / h_0)

Fig. 8 Spanwise variations of η and h_f / h_0 at $x/D = 10.0$

분포도 다른 양상을 보이는 것을 알 수 있다. 정 열배열의 경우(Fig. 7(a)), 막냉각 제트의 중심이 벽면 가까이 위치하므로 상류에서부터 와류의 영향이 강하게 나타난다. 하향류 위치에 해당하는 $z/D = -0.5$ 부근에 형성된 열전달계수가 높은 영역이 상향류 위치($z/D=1.0$ 부근)에 형성된 영역보다 열전달계수비가 크고 하향류로 진행해도 열전달계수가 높게 유지되는 것을 알 수 있다.

반면 엇갈린 배열이나 배열 4의 경우 (Fig. 7(c), (d)) 막냉각 제트가 벽면에서 분리되기 때문에 $x/D = 5.0$ 이내인 영역에서 제트의 상향류 위치에 형성된 열전달계수가 높은 영역이 하향류 위치에 형성된 영역보다 열전달계수를 높이는 데 중요한 역할을 하고 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 x/D 가 20보다 큰 영역에서는 상향류 위치에는 경계층이 두꺼워지면서 열전달이 낮은 영역이 존재하지만 하향류 위치에는 열전달이 높은 영역이 존재하는 것을 알 수 있다.

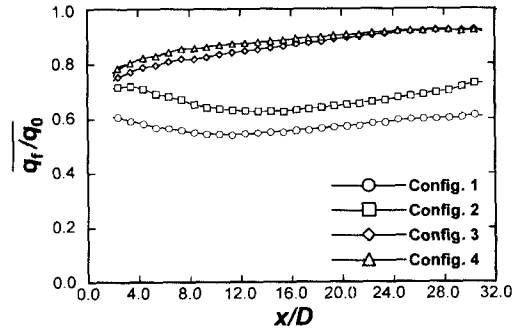


Fig. 9 Spanwise averaged heat flux ratio distribution

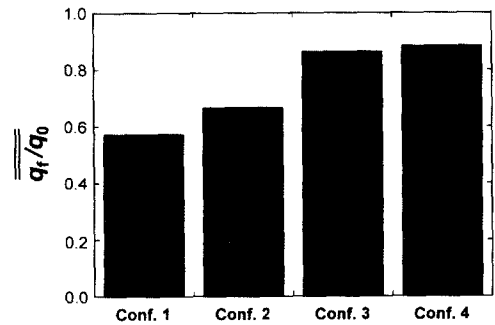


Fig. 10 Space averaged heat flux ratio

3.4 열유속비

막냉각의 궁극적인 목적은 냉각면의 열부하를 줄여주는 것이다. 막냉각에 의해 막냉각이 없을 때에 비해 열전달계수가 증가하므로 막냉각유체가 표면을 고온의 기체로부터 분리시키더라도 실제로 표면에 전달되는 열부하는 증가할 수 있다. 따라서 식 (8)과 같이 표현되는 열유속비가 1보다 작아야 막냉각에 의해 열부하가 줄어들었다고 할 수 있다.

막냉각효율(η)과 열전달계수비(h_f / h_0)의 $x/D = 10.0$ 인 위치에서 폭방향 분포를 보면(Fig. 8), 막냉각효율은 0.05에서 0.45의 범위에 걸쳐 분포하고 있고 각각의 배열에 따라 경향과 절대값 모두 큰 차이를 보이지만 열전달계수비의 경우 경향의 차이는 있지만 절대값은 1.0에서 1.3의 범위 내에 분포하므로 식 (8)로 표현한 열유속비(q_f / q_0)는 주로 막냉각효율의 영향을 받게 된다. 따라서 Fig. 9에 나타난 폭방향으로 평균한 열유속비의 분포를 보면, 다른 형상에 비해 막냉

각효율이 높은 정열배열(배열 1)에서 열유속비가 가장 낮은 것을 볼 수 있고 하류로 진행할수록 configuration 3이나 4와의 차이가 커지는 것을 볼 수 있다.

열유속비를 계산하여 $2.0 \leq x/D \leq 31.0$, $-6.0 \leq z/D \leq 6.0$ 의 영역에 대해 평균한 결과를 보면 (Fig. 10) 이러한 배열에 따른 열유속비의 차이를 보다 명료하게 파악할 수 있다. 정열배열의 경우 막냉각 유체가 벽면 가까이 위치하므로 엇갈린 배열이나 배열 4에 비해 35%정도 열유속비가 감소하는 것을 볼 수 있다.

4. 결론

반대방향의 방향각을 갖는 2열 분사구조의 막냉각에서는 상류 홀과 하류 홀의 상대적 배열에 따라 막냉각 제트의 궤적이 달라지고 이는 막냉각 성능에 큰 영향을 준다. 본 연구에서는 정열배열과 엇갈린 배열을 포함한 4가지 상대적 배열에서 막냉각 특성을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 막냉각 제트는 상류 홀에서 분사된 제트의 하향류 위치에 막냉각 홀이 존재하는 경우(정열배열의 경우) 벽면 가까이 위치하고, 상향류가 존재하는 경우 벽면에서 분리된다.

(2) 막냉각효율은 제트와 벽면의 상대적 위치에 크게 의존한다. 따라서 막냉각 제트가 벽면 가까이 위치하는 정열배열의 경우 다른 배열에 비해 막냉각효율이 높게 나타났다.

(3) 정열배열이나 배열 2의 경우 제트가 벽면 가까이 위치하기 때문에 상류 위치부터 제트에 형성된 와류가 열전달에 주로 영향을 준다.

(4) 엇갈린 배열이나 배열 4의 경우 상류 위치에서는 제트가 벽면에서 분리되어 제트 아래 부분에 생긴 난류가 열전달계수에 주로 영향을 주지만 하류로 진행할수록 와류에 의한 영향이 증가한다.

(5) 반대방향의 방향각을 갖는 2열 분사구조의 경우, 분사비 1.0에서 막냉각효율이 열전달계수보다 열유속비에 큰 영향을 주고 제트가 벽면 가까이 위치하는 정열배열에서 열유속비가 가장 큰 폭으로 감소하는 것을 관찰할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학기술평가원 국가지정연구실 사업에 의해 지원되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Lee, S. W., Kim, Y. B. and Lee, J. S., 1997, "Flow Characteristics and Aerodynamic Losses of Film Cooling Jets with Compound Angle Orientations," *ASME J. Turbomachinery*, Vol. 119, pp. 310~319.
- (2) Schmidt, D. L., Sen, B. and Bogard, D. G., 1996, "Film Cooling with Compound Angle Holes: Adiabatic Effectiveness," *ASME J. Turbomachinery*, Vol. 118, pp. 807~813.
- (3) Sen, B., Schmidt, D. L., and Bogard, D. G., 1996, "Film Cooling with Compound Angle Holes: Heat Transfer," *ASME J. Turbomachinery*, Vol. 118, pp. 800~806.
- (4) Muska, J. F., Fish, R. W. and Suo, M., 1976, "The Additive Nature of Film Cooling from Rows of Holes," *ASME J. Eng. for Power*, Vol. 98, pp. 457~464.
- (5) Eckert, E. G., 1984, "Analysis of Film Cooling and Full-Coverage Film Cooling of Gas Turbine Blades," *ASME J. Eng. for Gas Turbine and Power*, Vol. 106, pp. 206~213.
- (6) Mick, W. J. and Mayle, R. E., 1988, "Stagnation Film Cooling and Heat Transfer including its Effects within the Hole Pattern," *ASME J. Turbomachinery*, Vol. 110, pp. 66~72.
- (7) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainties in Single Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.
- (8) 안준, 이준식, 1999, "복합각도로 분사되는 제트의 막냉각 특성", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집. Vol. B, pp. 606-611.
- (9) Goldstein, R. J. and Taylor, J. R., 1982, "Mass Transfer in the Neighborhood of Jets Entering a Crossflow," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 715~721.